我国核数据实验研究进展

阮锡超
（中国原子能科学研究院 核数据重点实验室　北京　102413）

摘要　核数据，尤其是中子核数据，是国防建设、核能发展及核技术应用的基础，同时在核物理基础研究中也发挥重要作用。核数据的质量直接影响相关装置及产品的有效性、安全性、可靠性和经济性。实验数据是相关理论模型发展及核数据库研制的基础，因此，核数据实验研究在核数据研究中占有极其重要的地位。我国的核数据实验研究始于20世纪中期，经过数十年的发展，取得了丰硕的成果。本文将简要介绍我国核数据实验研究取得的进展，并尝试展望未来的发展。

关键词　核数据，实验数据，中子源

中图分类号　O571.5

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080003

Nuclear data measurement progress in China

RUAN Xichao
(*Key Laboratory of Nuclear Data*, *China Institute of Atomic Energy*, *Beijing 102413*, *China*)

Abstract　Nuclear data, especially neutron nuclear data, forms the foundation of national defense, nuclear energy development, and the applications of nuclear technology. It also plays a critical role in fundamental nuclear physics research. The quality of nuclear data directly impacts the effectiveness, safety, reliability, and economy of related devices and products. Experimental data serves as the foundation for developing theoretical models and nuclear data libraries. Therefore, experimental research holds a paramount position in nuclear data research. The experimental research on nuclear data in China commenced in the mid-1950s and has achieved fruitful results after decades of development. In this article, we provide a brief overview of the progress made in experimental research on nuclear data in China and outline potential future advancements.

Key words　Nuclear data, Experimental data, Neutron source

核数据是用于描述具有一定能量的入射粒子与原子核相互作用的核反应数据及描述单个核素基本性质的核结构和放射性衰变数据的统称。其中，核反应数据主要包括反应截面、次级粒子出射的角分布及能谱、双微分截面、γ产生截面、裂变产物产额等；核结构与衰变数据主要包括：原子核质量、半衰期、衰变分支比、能级纲图等。中子诱发核反应的核数据在核能开发（包括裂变能与聚变能）与核技术应用具有最重要的应用价值[1-5]。核数据的产生流程是：1）利用核物理实验方法获得关键的核反应及核结构实验数据，实验数据虽然是第一性的，但往往是离散、不完整的，单靠实验数据无法构建完整、成套的核数据库；2）利用已有实验数据，结合核反应、核结构理论模型，确定和优化模型参数，在此基础上通过模型计算获得成套、完整的核数据库；3）利用核数据宏观检验实验数据配合粒子输运计算，对核数据库进行宏观检验，以确保数据库质量。从核数据的工作流程可以看出，核数据的实验研究是核数据工

国家自然科学基金(No.11790321)、核数据专项基金(No.4210401)资助
第一作者：阮锡超，男，1972年出生，2006年于中国原子能科学研究院获博士学位，研究领域为中子物理，E-mail：xichao_ruan@126.com
收稿日期：2023-06-05，修回日期：2023-07-05
Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11790321), Nuclear Data Special Fund (No.4210401)
First author: RUAN Xichao, male, born in 1972, graduated from China Institute of Atomic Energy with a doctoral degree in 2006, focusing on neutron physics, E-mail: xichao_ruan@126.com
Received date: 2023-06-05, revised date: 2023-07-05

作中最重要、最基础的工作。鉴于核数据实验工作的重要性，各核强国都投入了大量的人力和物力开展实验工作，国际上的核数据实验工作开始于20世纪40年代，为当时的核武器设计、研制与测试起到了强大的支撑作用。此后，为满足国防建设、核能开发及核技术应用的需求，各国持续进行核数据实验工作，为现有国际上几个主要核数据库的研制做出了重要贡献。我国的核数据实验工作始于20世纪50年代，为不同时期我国的国防建设、核能开发及核技术应用做出了重要贡献，经过数十年的发展，已建立了具有一定规模、较高水平、有特色的实验研究体系，为我国自主的核数据库《中国评价和数据库——CENDL》[6]研制提供了重要支撑，CENDL库也奠定了我国成为国际上的核数据大国地位。

本文将介绍我国核数据测量方面的进展，同时也尝试给出一些展望。核数据测量工作的支撑条件包括中子源、探测器、测量方法和样品制备等方面。因此本文将首先介绍核数据测量用中子源及探测系统情况，然后介绍核数据测量进展，最后给出展望与总结。

1 用于核数据测量的中子源

目前，我国用于核数据测量的中子源主要包括：1）反应堆中子源，如中国先进研究堆、绵阳研究堆等，主要提供热中子束流；2）静电加速器中子源，如中国原子能科学研究院的HI-13串列加速器、600 kV高压倍加器、5SDH-2串列加速器，北京大学的4.5 MV静电加速器，四川大学的2×3 MV串列加速器，中国工程物理研究院核物理与化学研究所、兰州大学及中国科学院核能安全研究所的高压倍加器等，主要提供从几十keV至40 MeV的单能及准单能中子；3）电子加速器中子源，如中国科学院上海应用物理研究所的TMSR-PNS[7]，可提供热中子至keV能区的白光中子；4）中国散裂中子源反角白光中子源（CSNS Back-n）[8-9]，可提供热中子至300 MeV能区的白光中子。这些中子源构成了我国核数据测量的主要设施，他们的主要参数如表1所示。

表1 我国用于核数据测量的主要中子源装置及参数

Table 1 Main neutron sources and parameters for nuclear data measurement in China

设备 Facility	中子能量 Neutron energy	强度 Intensity
中国原子能科学研究院，中国工程物理研究院等，反应堆 China Institute of Atomic Energy, China Academy of Engineering Physics, Reactor	热中子 Thermal neutron	10^{14} n·cm^{-2}·s^{-1}
中国原子能科学研究院，HI-13串列加速器 China Institute of Atomic Energy, HI-13 tandem accelerator	4~42 MeV	10^{6}~10^{8} n·sr^{-1}·s^{-1}
中国原子能科学研究院，2×1.7 MV小串列 China Institute of Atomic Energy, 2×1.7 MV tandem accelerator	0.03~6，14~20 MeV	10^{8}~10^{9} n·sr^{-1}·s^{-1}
中国原子能科学研究院、兰州大学、中国工程物理研究院等，高压倍加器 China Institute of Atomic Energy, Lanzhou University, China Academy of Engineering Physics, Cockcroft-Walton accelerator	2.5, 14 MeV	10^{8} n·sr^{-1}·s^{-1}，10^{10} n·sr^{-1}·s^{-1}
北京大学，4.5 MV静电加速器 Peking University, Van De Graaff accelerator	0.03~7 MeV	10^{7}~10^{8} n·sr^{-1}·s^{-1}
四川大学，2×3 MV串列加速器, Sichuan University, 2×3 MV tandem accelerator	0.03~9，15~22 MeV	10^{8}~10^{9} n·sr^{-1}·s^{-1}
中国科学院上海应用物理研究所 Shanghai Institute of Applied Physics, CAS, TMSR-PNS	热中子~keV Thermal neutron ~keV	10^{4} n·cm^{-2}·s^{-1}
中国科学院高能物理研究所 Institute of High Energy Physics, CAS, CSNS Back-n	热中子~300 MeV Thermal neutron~300 MeV	10^{7} n·cm^{-2}·s^{-1}

2 核数据实验设施情况

基于上述中子源，建成了一系列核数据实验设施，主要包括以下设施。

2.1 HI-13串列加速器上的多探测器快中子飞行时间谱仪

该谱仪[10]主要用于中子弹性及非弹性散射微分截面、次级中子双微分截面等数据的测量。如图1所示，谱仪由三个主中子探测器、一个监视器和一套转角谱仪组成，探测角度可以覆盖−30°~160°，飞行距离可达7 m，时间分辨可达1 ns。该谱仪配有氘气体靶和氚气体靶系统，可在中子能量5~42 MeV能区开展相关实验工作。

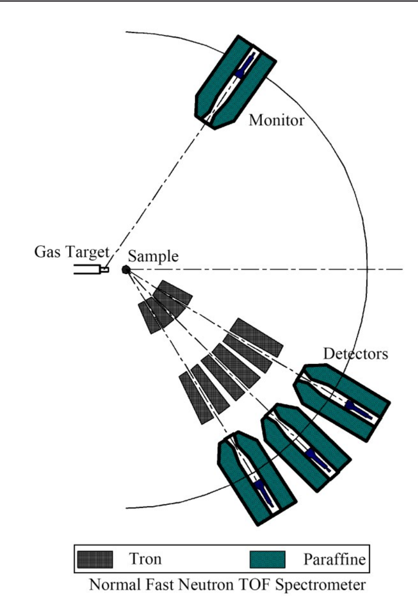


图1 中国原子能科学研究院的快中子飞行时间谱仪
Fig.1 The fast neutron TOF spectrometer at the China Institute of Atomic Energy (CIAE)

2.2 HI-13串列加速器上的HPGe探测器阵列

该探测器阵列[11]主要用于中子非弹伽马产生截面、(n，*x*n)反应的伽马产生截面等数据的测量。如图2所示，探测器阵列由6个Clover探测器和6个小平面探测器组成，每个Clover探测器由4个相对探测效率为38%的高纯锗探测器组成，并配有BGO反康环。



图2 HPGe探测器阵列
Fig.2 HPGe detector array

2.3 原子能院高压倍加器上的氦-3球型中子探测器阵列

主要用于(n，2n)反应截面的在线测量，即通过直接测量(n，2n)反应出射的两个中子获得(n，2n)反应截面。图3为该探测系统[12]的照片，探测系统由110根氦-3管均匀地镶嵌在球形的聚乙烯慢化体中，探测系统对^{252}Cf自发裂变中子的探测效率可达30%，一方面具有较高的探测效率，另一方面与常用的大液体闪烁探测器相比，具有对伽马不灵敏的优点。

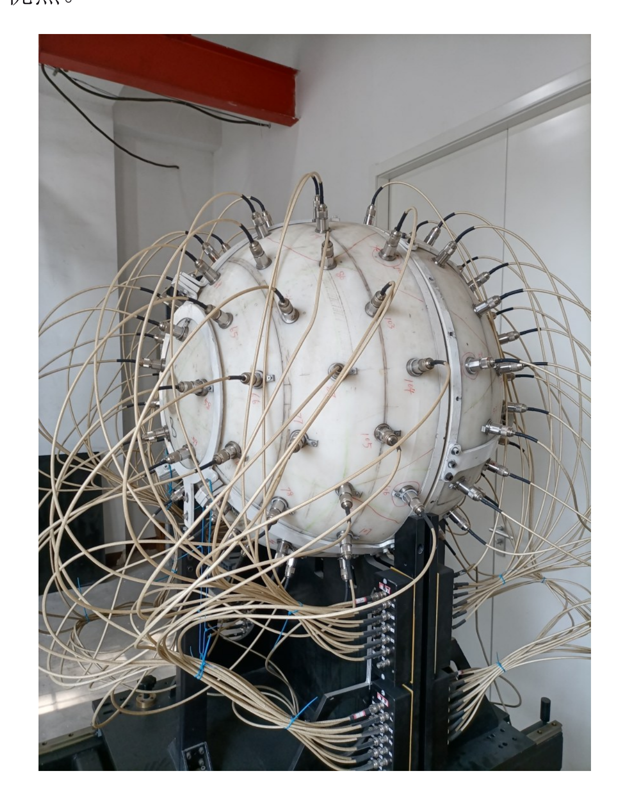


图3 氦-3球形中子探测器阵列
Fig.3 Spherical He-3 detector array

2.4 原子能院的裂变碎片鉴别谱仪

如图4所示，该谱仪[13]主要用于裂变碎片质量分布测量，谱仪主要由一套高分辨的飞行时间探测器和高能量分辨的裂变碎片能量探测器组成，飞行时间探测器的时间分辨可达150 ps，能量探测器的能量分辨可好于0.5%(Cu离子，80 MeV)，系统的质量分辨对于*A*=90左右的轻峰可好于1，对于*A*=140左右的重峰可达1.4。



图4 裂变碎片鉴别谱仪
Fig.4 Fission fragment identification spectrometer

2.5 CSNS Back-n上的氟化钡探测器阵列（GTAF-II）

如图5所示，该装置[14]主要用于(n,γ)反应截面测量，由12块五棱台和28块六棱台BaF_2晶体组成一个球形探测器阵列，内空腔直径为20 cm，用于放置样品。每块晶体的厚度为15 cm，最大直径为14 cm。系统对(n,γ)反应后级联γ射线的总探测效率接近100%。

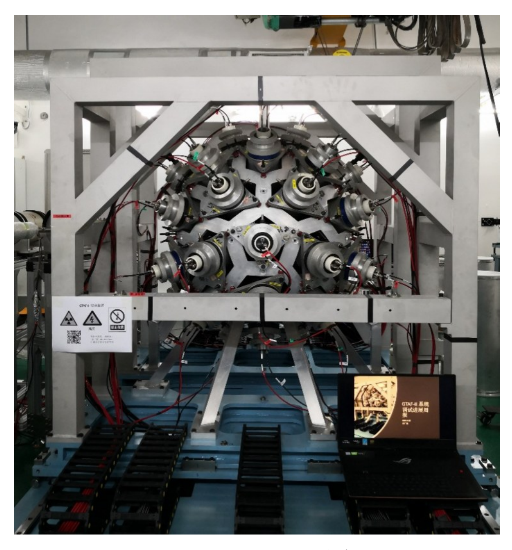


图5 GTAF-II照片
Fig.5 The GTAF-II facility

2.6 CSNS Back-n上的C_6D_6谱仪

该谱仪[15]也主要用于(n,γ)反应截面测量，由4个尺寸为Ø12.7 cm×7.62 cm的氘代液体闪烁体探测器及配套的电子学与数据获取系统组成。该谱仪与GTAF-II谱仪可以形成互补关系，C_6D_6谱仪主要用于反应截面较大、稳定核素的(n,γ)反应截面测量，而GTAF-II由于具有很高的探测效率，主要用于小截面或微量样品（如稀有同位素、不稳定核素等）的(n,γ)反应截面测量。

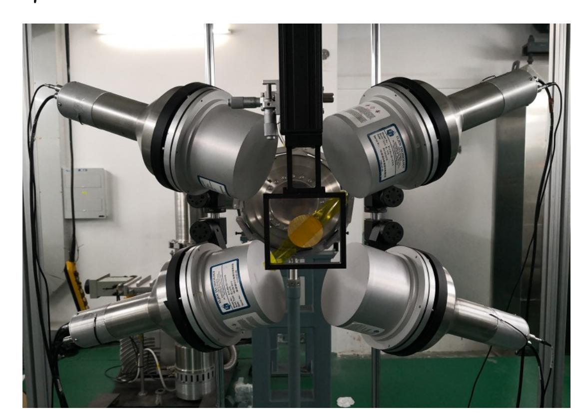


图6 C_6D_6谱仪
Fig.6 C_6D_6 detector system

2.7 CSNS Back-n上的LPDA谱仪

该谱仪[16]主要用于中子引起的带电粒子出射反应的核数据测量。谱仪由16单元的ΔE-ΔE-E望远镜组成，整个望远镜系统安装在直径为1 m的真空靶室内，每个望远镜单元由1个低气压多丝正比室、1个300 μm厚的Si探测器及1个3 cm厚的CsI晶体探测器组成。对于质子，该谱仪可探测的能量范围为0.5~100 MeV，具有很宽的动态范围。



图7 LPDA谱仪
Fig.7 The LPDA facility

2.8 CSNS Back-n上的裂变截面测量谱仪FIXM

该谱仪[16]主要用于裂变截面测量，由一个8单元的多层快裂变电离室组成，裂变室内可以安装8片裂变样品，用于裂变截面的同时测量，裂变样品通过电镀方法镀到20 μm厚的不锈钢底衬或100 μm厚的铝底衬上，样品直径约5 cm。配合快前放，该裂变电离室的信号上升时间可达30 ns左右，适用于快中子的飞行时间测量。



图8 FIXM谱仪
Fig.8 FIXM spectrometer

2.9 其他设施

除了以上核数据测量设施外，也有其他不少实验设施用于核数据测量，如北京大学用于(n,α)反应截面测量的屏栅电离室、中国工程物理研究院核物理与化学研究所及中国原子能科学研究院的中子核数据积分实验装置、中国科学院上海应用物理研究所的核数据测量设施、中国科学院近代物理研究所的带电粒子诱发核反应的核数据测量设施等。

3 核数据实验研究进展

依托上述中子源及核数据实验设施，多年来开展了大量的核数据实验工作，取得了丰硕的成果，主要成果介绍如下。

3.1 次级中子微分及双微分截面测量

次级中子微分及双微分截面是核数据理论模型检验及确定模型参数的重要数据，同时也是核装置设计中子输运计算的重要数据。早期基于我国的第一台回旋加速器，建立了快中子飞行时间谱仪，后来基于高压倍加器也建立了快中子飞行时间谱仪，完成了一些重要核素的次级中子双微分截面测量。HI-13串列加速器及多探测器快中子飞行时间谱仪建成后，完成了大量核素在一系列能点的实验测量。尤其是在8~14 MeV能区，由于常用中子源(如p+T、d+D反应中子源)在这一能区有破裂中子的存在，次级中子能谱在低能区受到破裂中子的严重干扰，因此，8~14 MeV能区的次级中子双微分截面测量成为国际难题。中国原子能科学研究院在国际上首次提出了非常规快中子飞行时间谱仪方法[17]，通过常规谱仪与非常规谱仪的结合，可有效避免破裂中子的影响，同时也保证测量结果的能量分辨。所完成的主要工作列于表2[18-19]。图9为10.27 MeV中子与^{6}Li反应的部分次级中子双微分截面结果。

表2 完成的次级中子双微分截面测量工作

Table 2 DDX measurements achieved at CIAE

能量 Neutron energy	样品 Sample
~14 MeV	C、^{238}U、D、^{209}Bi、^{6,7}Li、Zr、Al
~6 MeV	Be
~8 MeV	^{6,7}Li、Fe、Be、D、Ga
~10 MeV	^{6,7}Li、Be、V、^{238}U、^{209}Bi、Fe、C
20~40 MeV	Be、C、^{209}Bi

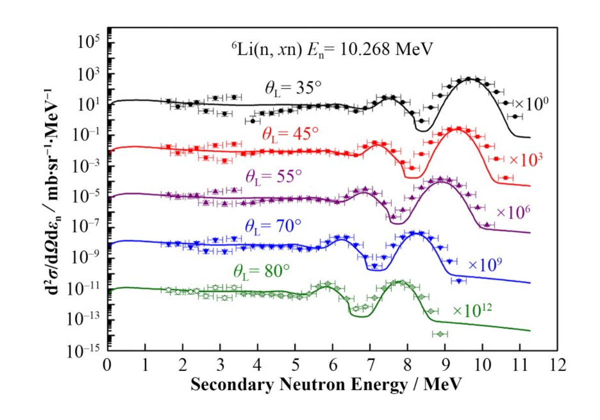


图9 10.27 MeV中子与^{6}Li反应的部分次级中子双微分截面测量结果

Fig.9 Part of the measured DDX results for ^{6}Li induced by 10.27 MeV neutrons

3.2 裂变产额测量

裂变产物产额数据是裂变物理研究、反应堆设计与运行、核材料检测等方面的重要数据。我国先后建立了裂变产额测量的放化法及直接伽马能谱法，完成了大量的实验测量(表3)。近年来，中国原子能科学研究院、西北核技术研究院及中国工程物理研究院核物理与化学研究所都在发展裂变碎片质量分布测量技术，其中中国原子能科学研究院利用FFIS谱仪已完成热中子诱发^{235}U及^{239}Pu裂变的裂变碎片质量分布测量[20]，获得了高质量的实验数据。

表3 完成的裂变累积产额测量工作

Table 3 Cumulative fission yield measurements finished at CIAE

裂变核 Fission nucleus	中子能量 Neutron energy	产物核素 Product nuclide
U-238	裂变谱 Fission spectrum、3 MeV、5 MeV、8 MeV、14 MeV	^{95}Zr、^{99}Mo、^{140}Ba、^{147}Nd等数十种裂变产物 Dozens of fission products such as ^{95}Zr, ^{99}Mo, ^{140}Ba, ^{147}Nd, etc.
U-235	热能 Thermal energy、0.5 MeV、1 MeV、1.5 MeV、3 MeV、5 MeV、8 MeV、14 MeV	^{95}Zr、^{99}Mo、^{140}Ba、^{147}Nd等二十多种裂变产物 More than 20 types of fission products including ^{95}Zr, ^{99}Mo, ^{140}Ba, ^{147}Nd, etc.
U-235、238	热能 Thermal energy、3 MeV、14 MeV	^{85m,87,88}Kr、^{135,138}Xe等气体裂变产物 Gaseous fission products such as ^{85m,87,88}Kr, ^{135,138}Xe, etc.
Th-232	14 MeV	^{95}Zr、^{99}Mo、^{140}Ba、^{147}Nd等二十多种裂变产物 More than 20 types of fission products including ^{95}Zr, ^{99}Mo, ^{140}Ba, ^{147}Nd, etc.
U-235, Pu-239	热能 Thermal energy	^{95}Y、^{138}Cs、^{101}Mo、^{142}La等多种短寿命核素 Various short life nuclides such as ^{95}Y, ^{138}Cs, ^{101}Mo, ^{142}La, etc.

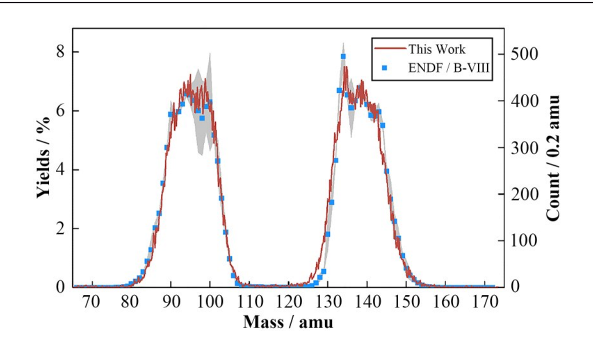


图10 热中子诱发^{235}U裂变的裂变碎片质量分布测量结果（amu为原子质量单位）
Fig.10 Measured results of mass distribution for ^{235}U induced by thermal neutrons (amu means atomic mass unit)

3.3 激发函数测量

(n，2n)、(n，3n)、(n，γ)、(n，p)、(n，α)等反应激发函数在核物理基础研究、中子场参数诊断、核技术应用等领域有重要应用价值，如(n，2n)及(n，γ)反应截面在核装置设计的中子学计算中有重要作用，同时也广泛用于中子注量率及中子能谱测量等。对激发函数的测量大体分为离线和在线两种测量方法。离线法即活化法，把待测样品放在中子场中辐照，然后通过测量生成核的活度获得相应的反应截面，这种方法的优点是简单、结果也比较可靠，缺点是只能开展单能点或者特定能谱(如裂变谱)条件下的反应截面测量，此外不是所有的核素都可以采用活化法，只有生成核是放射性的、具有合适的半衰期且适合测量的核素才可以采用此方法。在线法是通过测量反应时瞬发的粒子产额来获得反应截面的方法，在线法的优点是普适性强，而且可以利用白光中子源一次实验获得较宽能区的激发函数，大大提高实验测量的效率，缺点是对样品的纯度要求高，通常需要用同位素样品开展实验。我国早期大多采用活化法测量激发函数数据，完成了大量的实验测量，包括一系列核素的(n，2n)、(n，γ)、(n，p)、(n，α)等100多个反应道的实验测量(如文献[21−22]等)，这些数据部分填补了空白、部分澄清了数据分歧，为我国激发函数库的研制提供了重要支撑。近年来，在线法得到了快速发展，包括基于直接中子法[12]及瞬发伽马射线法的(n，2n)反应截面测量方法、基于白光中子源的(n，γ)反应截面测量方法[23−24]、基于白光中子源及北京大学的(n，xn)反应数据测量方法等[25]，取得了丰硕的成果。

3.4 其他类型的核数据测量

除上述核数据外，我国在γ产生截面、裂变截面、中子全截面、积分数据、带电粒子诱发的核反应数据等方面也取得了大量的实验成果。γ产生截面主要利用中国原子能科学研究院的HI-13串列加速器及HPGe探测器阵列，完成大量7~11 MeV能区的中子非弹及(n，2nγ)产生截面测量。裂变截面则主要基于中国散裂中子源，完成了eV至百MeV能区的^{235}U、^{236}U、^{238}U及^{239}Pu的裂变截面测量[26−27]。中子全截面也是基于中国散裂中子源，完成了Al、Be、C等材料的实验测量[28]。积分数据则主要由中国工程物理研究院核物理与化学研究所及中国原子能科学研究院开展，完成大量的球状及板状样品的屏蔽积分实验[29−30]，为核数据库的宏观检验提供了重要的积分实验数据。带电粒子诱发的核反应数据则主要基于HI-13串列加速器及中国科学院近代物理研究所的加速器进行，也完成了许多实验测量。

4 总结与展望

我国的核数据测量长期以来以满足国防需求为主，最初为国防建设的急需完成了^{235,238}U、^{239}Pu关键核数据、d+^{6}Li反应截面、^{6}Li(n，t)反应激发函数等的实验测量，为我国“两弹”的研制做出了重要贡献。随后，根据相关需求完成了大量激发函数、裂变产额、次级中子微分及双微分截面、γ产生截面、衰变数据、积分数据的测量与评价，填补了一些数据空白，澄清了许多数据分歧，有力地支持了我国核事业的发展。

近年来，出于新型核能系统研发的需求，国内对核数据测量的投入也越来越多，如针对聚变堆、钍基熔盐堆、ADS等研发需求，各单位对核数据的关注度越来越高。此外，近年来国内各种先进辐射源平台(如中国散裂中子源、中国科学院上海应用物理研究所的TMSR-PNS、中国科学院上海高等研究院的上海激光电子伽马源(Shanghai Laser Electron Gamma Source，SLEGS)等)的建设也大大促进了我国核数据测量基础能力的提升，使得我国的核数据测量能力得到大幅提升。随着各大装置的陆续建成并投入使用，必将进一步促进我国核数据实验研究的发展。

作者贡献声明 本文由阮锡超单独撰写完成。

参考文献

1 Artisyuk V, Broeders C, Gonzalez-Romero E, *et al.* Challenge of nuclear data for innovative nuclear energy[J]. Progress in Nuclear Energy, 2008, **50**(2 − 6): 341 − 346. DOI: 10.1016/j.pnucene.2007.11.015.

2 Harada H. Meeting nuclear data needs for advanced reactor systems[R]. OECD/NEA/NSC/WPEC/DOC.

2014: 446.

3 Koning A J, Blomgren J, Jacqmin R, *et al*. Nuclear data for sustainable nuclear energy[R]. Coordinated action on nuclear data for industrial development in Europe - CANDIDE, European Commission-Joint Research Center-IRMM, 2009.

4 Sartori E. Nuclear data for radioactive waste management [J]. Annals of Nuclear Energy, 2013, **62**: 579 – 589. DOI: 10.1016/j.anucene.2013.02.003.

5 Fischer U, Batistoni P, Cheng E, *et al*. Nuclear data for fusion energy technologies: requests, status and development needs[C]. Proceedings for the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology. SantaFe(USA): AIP, 2004: 1478 – 1485.

6 Ge Z G, Xu R R, Wu H C, *et al*. CENDL-3.2: the new version of Chinese general purpose evaluated nuclear data library[J]. EPJ Web of Conferences, 2020, **239**: 09001. DOI: 10.1051/epjconf/202023909001.

7 王宏伟, 陈金根, 蔡翔舟, 等. 电子直线加速器驱动的光中子源装置的研制[J]. 核技术, 2014, **37**(10): 100522. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.100522.

WANG Hongwei, CHEN Jingen, CAI Xiangzhou, *et al*. Development of photo-neutron facility driven by electron LINAC[J]. Nuclear Techniques, 2014, **37**(10): 100522. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.100522.

8 An Q, Bai H Y, Bao J, *et al*. Back-n white neutron facility for nuclear data measurements at CSNS[J]. Journal of Instrumentation, 2017, **12**(7): P07022. DOI: 10.1088/1748-0221/12/07/p07022.

9 唐靖宇, 安琪, 白怀勇, 等. 中国第一台高性能白光中子源: CSNS反角白光中子源及其应用[J]. 原子能科学技术, 2019, **53**(10): 2012 – 2022. DOI: 10.7538/yzk.2019.youxian.0431.

TANG Jingyu, AN Qi, BAI Huaiyong, *et al*. China's first high-performance white neutron source: CSNS back-n white neutron source and application[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, **53**(10): 2012 – 2022. DOI: 10.7538/yzk.2019.youxian.0431.

10 撒骏, 唐洪庆, 周祖英, 等. 多探测器快中子飞行时间谱仪[J]. 原子能科学技术, 1992, **26**(6): 1 – 8.

SA Jun, TANG Hongqing, ZHOU Zuying, *et al*. Multi-detector fast neutron time of flight spectrometer[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1992, **26**(6): 1 – 8.

11 孙琪, 王朝辉, 张奇玮, 等. 利用瞬发γ射线法测量^{209}Bi的中子非弹性散射截面[J]. 原子能科学技术, 2022, **56**(5): 816 – 824. DOI: 10.7538/yzk.2022.youxian.0189.

SUN Qi, WANG Zhaohui, ZHANG Qiwei, *et al*. Measurement of ^{209}Bi neutron inelastic scattering cross section with prompt γ ray method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, **56**(5): 816 – 824. DOI: 10.7538/yzk.2022.youxian.0189.

12 Chen J Q, Chen X J, Ruan X C, *et al*. A new neutron detector designed for (n, 2n) and (n, 3n) reaction cross section measurements[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, **910**: 157 – 163. DOI: 10.1016/j.nima.2018.09.020.

13 Liu C, Liu S L, Yang Y, *et al*. The FFIS spectrometer for determination of fission fragment mass distribution with the energy-velocity method[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, **1041**: 167319. DOI: 10.1016/j.nima.2022.167319.

14 张奇玮, 栾广源, 任杰, 等. 基于CSNS反角白光中子源的中子俘获反应截面测量技术研究[J]. 物理学报, 2021, **70**(22): 222801. DOI: 10.7498/aps.70.20210742.

ZHANG Qiwei, LUAN Guangyuan, REN Jie, *et al*. Cross section measurement of neutron capture reaction based on back-streaming white neutron source at China spallation neutron source[J]. Acta Physica Sinica, 2021, **70**(22): 222801. DOI: 10.7498/aps.70.20210742.

15 Ren J, Ruan X C, Bao J, *et al*. The C_6D_6 detector system on the Back-n beam line of CSNS[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2019, **3**(3): 52. DOI: 10.1007/s41605-019-0129-8.

16 Fan R R, Li Q, Bao J, *et al*. Detector development at the Back-n white neutron source[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2023, **7**: 171 – 191. DOI: 10.1007/s41605-022-00379-5.

17 祁步嘉, 唐洪庆, 周祖英. 一种测量次级中子能谱的新方法[J]. 物理, 2002, **31**(1): 36 – 39. DOI: 10.3321/j.issn:0379-4148.2002.01.009.

QI Bujia, TANG Hongqing, ZHOU Zuying. A new method to measure secondary neutron spectra[J]. Physics, 2002, **31**(1): 36 – 39. DOI: 10.3321/j. issn: 0379-4148.2002.01.009.

18 Ruan X C, Zhou Z Y, Chen G C, *et al*. Measurements of neutron emission spectra for neutron induced reactions on ^{9}Be and ^{6,7}Li[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2007, **31**(5): 442 – 447.

19 Ruan X C, Chen G C, Huang H X, *et al*. Measurement of

the secondary neutron emission differential and double-differential cross sections between 20 and 30 MeV[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2011, **59**(2): 1729 – 1732. DOI: 10.3938/jkps.59.1729.

20 刘超, 刘世龙, 杨毅, 等. 热中子诱发 ^{239}Pu裂变初级裂变产物质量分布测量[J]. 原子能科学技术, 2022, **56**(5): 798 – 804. DOI: 10.7538/yzk.2022.youxian.0054.

LIU Chao, LIU Shilong, YANG Yi, *et al*. Measurement of post-neutron mass distribution in thermal-neutron-induced fission of ^{239}Pu[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, **56**(5): 798 – 804. DOI: 10.7538/yzk.2022.youxian.0054.

21 卢涵林, 王大海, 崔云峯, 等. Al, Ti, V, In和I核的快中子激发曲线[J]. 原子能科学技术, 1975, **9**(2): 113 – 126.

LU Hanlin, WANG Dahai, CUI Yunfeng, *et al*. Fast neutron excitation curves of Al, Ti, V, in and I nuclei[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1975, **9**(2): 113 – 126.

22 卢涵林, 赵文荣, 于伟翔, 等. ^{176}Hf(n, 2n)^{175}Hf和 ^{185}Re(n, 2n)^{184}Re^{m,g}反应截面研究[J]. 原子能科学技术, 1999, **33**(5): 410 – 414.

LU Hanlin, ZHAO Wenrong, YU Weixiang, *et al*. The cross sections of ^{176}Hf(n, 2n)^{175}Hf and ^{185}Re (n, 2n)^{184}Re^{m,g} reactions[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1999, **33**(5): 410 – 414.

23 Ren J, Ruan X C, Jiang W, *et al*. Neutron capture cross section of ^{169}Tm measured at the CSNS Back-n facility in the energy region from 30 to 300 keV[J]. Chinese Physics C, 2022, **46**(4): 044002.

24 任杰, 阮锡超, 王金成, 等. 基于白光中子源的 ^{169}Tm辐射俘获截面测量和共振参数分析[J]. 原子能科学技术, 2022, **56**(5): 805 – 815. DOI: 10.7538/yzk.2022.youxian.0125.

REN Jie, RUAN Xichao, WANG Jincheng, *et al*. Radiative capture cross-section measurement and resonance parameter analysis for ^{169}Tm based on white neutron source[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, **56**(5): 805 – 815. DOI: 10.7538/yzk.2022.youxian.0125.

25 张国辉. 中子诱发轻带电粒子出射核反应实验研究进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, **50**(5): 052005.

ZHANG Guohui. Progress of experimental researches on neutron induced light charged-particle emission nuclear reactions[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2020, **50**(5): 052005.

26 Wen J, Yang Y W, Wen Z W, *et al*. Measurement of the U-238/U-235 fission cross section ratio at CSNS - Back-n WNS[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, **140**: 107301. DOI: 10.1016/j.anucene.2019.107301.

27 Ren Z Z, Yang Y W, Wen J E, *et al*. Measurement of the ^{236}U(n, f) cross section for neutron energies from 0.4 MeV to 40 MeV from the back-streaming white neutron beam at the China Spallation Neutron Source[J]. Physical Review C, 2020, **102**(3): 034604. DOI: 10.1103/physrevc.102.034604.

28 Liu X Y, Yang Y W, Liu R, *et al*. Measurement of the neutron total cross sections of aluminum at the Back-n white neutron source of CSNS[J]. The European Physical Journal A, 2021, **57**(7): 232. DOI: 10.1140/epja/s10050-021-00513-9.

29 刘荣, 鹿心鑫, 安力, 等. 中子学实验近期进展[J]. 物理, 2009, **38**(12): 889 – 893.

LIU Rong, LU Xinxin, AN Li, *et al*. Recent progress of neutronics experiments[J]. Physics, 2009, **38**(12): 889 – 893.

30 Nie Y B, Ren J, Ruan X C, *et al*. Benchmark experiments with slab sample using time-of-flight technique at CIAE [J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, **136**: 107040. DOI: 10.1016/j.anucene.2019.107040.